

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.04.020

利用高通量测序分析冷鲜羊肉优势腐败菌群 及相关抑菌剂效价评定

温蕾^{1,2}, 马艳丽^{2*}, 柳尧波², 王维婷², 杜鹏飞², 胡鹏², 曹建芳², 李永生², 贺红军^{1*}

(1. 烟台大学 生命科学学院, 山东 烟台 264005; 2. 山东省农业科学院 农产品加工与营养研究所, 山东省农产品精深加工技术重点实验室, 农业农村部新食品资源加工重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: 为研究天然抑菌剂对冷鲜羊肉优势腐败菌的抑菌效力并筛选靶向抑菌剂, 首先采用高通量测序法分析冷鲜羊肉在4℃贮藏过程中腐败菌的演替规律, 然后针对性的选择两种醛类(柠檬醛和肉桂醛)天然抑菌剂, 通过测定抑菌圈大小、最小抑菌浓度对比其对冷鲜羊肉腐败菌的抑制效果。结果表明, 主要腐败菌为嗜冷假单胞菌(*Pseudomonas psychrophila*)、热杀索丝菌(*Brochothrix thermosphacta*)、溶酪葡萄球菌(*Macrococcus caseolyticus*)、不动杆菌(*Acinetobacter*)、养料嗜冷杆菌(*Psychrobacter cibarius*)。肉桂醛对各受试菌的抑菌能力更加显著, 最小抑菌浓度为0.08~2.50 mg/mL。

关键词: 冷鲜羊肉; 高通量测序; 菌株鉴定; 优势腐败菌; 柠檬醛; 肉桂醛

Analysis of Dominant Spoilage Bacteria by High-Throughput Sequencing and Evaluation of Inhibitory Effects of Antimicrobial Agents for Chilled Mutton

WEN Lei^{1,2}, MA Yanli^{2*}, LIU Yaobo², WANG Weiting², DU Pengfei², HU Peng², CAO Jianfang²,LI Yongsheng², HE Hongjun^{1*}

(1. School of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Agro-Products Processing Technology, Key Laboratory of Novel Food Resources Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food and Nutrition Science and Technology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: The inhibitory effects of natural antimicrobial agents on the dominant spoilage bacteria of chilled mutton were evaluated and targeted natural antimicrobial agents were screened. High-throughput sequencing was employed to analyze the succession pattern of spoilage bacteria of chilled mutton during storage at 4℃. Subsequently, two aldehyde-based natural antimicrobial agents (cinnamaldehyde and citral) were selected, and their inhibitory effects on spoilage bacteria were compared based on inhibition zone diameters and minimum inhibitory concentrations. The results indicated that the dominant spoilage bacteria were *Pseudomonas psychrophila*, *Brochothrix thermosphacta*, *Macrococcus caseolyticus*, *Acinetobacter*, and *Psychrobacter cibarius*. Cinnamaldehyde demonstrated more pronounced antimicrobial activities against all the tested strains, with the minimum inhibitory concentrations ranging from 0.08-2.50 mg/mL.

Key words: chilled mutton; high-throughput sequencing; strain identification; dominant spoilage bacteria; citral; cinnamaldehyde

引文格式:

温蕾, 马艳丽, 柳尧波, 等. 利用高通量测序分析冷鲜羊肉优势腐败菌群及相关抑菌剂效价评定[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 149-154.

WEN Lei, MA Yanli, LIU Yaobo, et al. Analysis of Dominant Spoilage Bacteria by High-Throughput Sequencing and Evaluation of Inhibitory Effects of Antimicrobial Agents for Chilled Mutton[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 149-154.

基金项目: 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2023F09); 山东省重点研发计划项目(2022TZXD0021); 国家肉羊产业技术体系建设专项(CARS-38); 山东省羊产业技术体系(SDAIT-10-10); 中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX2022149、YDZX2022135)

作者简介: 温蕾(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全。

*通信作者: 马艳丽(1987—), 女, 博士, 研究方向: 肉制品加工与品质调控; 贺红军(1967—), 男, 博士, 研究方向: 食品加工与安全。

肉及肉制品含有丰富的蛋白质、维生素和矿物质,是当今社会人类饮食结构的重要组成部分^[1]。羊肉是百姓“菜篮子”的重要品种,2022年我国羊肉产量为525万t,已跨入世界生产大国行列。近年来,由于病毒性疾病如禽流感和非洲猪瘟的出现,一些国家已经开始减少活体动物的流通,并由此转向肉类运输^[2-3]。然而,羊肉中较高的蛋白质和水分含量会加速微生物繁殖,导致羊肉腐败变质^[4-5]。目前低温贮藏羊肉的流通和销售中发挥着重要的作用,这种贮藏方式可以抑制部分微生物的生长,降低腐败速率,延长货架期^[6]。但是嗜冷菌的存在,仍会造成羊肉仓储运输过程中微生物污染。人们尝试通过添加化学防腐剂来延长肉制品的保质期^[7]。但大量研究表明,化学防腐剂会危害人体健康,且存在致癌、致畸的风险^[8]。因此,开发绿色、安全的天然抑菌剂成为当前肉类保鲜的研究热点^[9-10]。

醛类物质在天然防腐剂中扮演着重要角色,应用比较广泛的是柠檬醛和肉桂醛^[11]。柠檬醛是存在于柠檬精油中的一种天然化合物,被广泛应用于食品、日用品、保鲜等行业,通过改变细菌细胞膜的完整性和通透性抑制细菌生长^[12]。肉桂醛是肉桂提取物的主要成分,是美国食品药品监督管理局认定的一种安全的添加剂^[13]。研究表明,肉桂精油通过增加大肠杆菌细胞膜的通透性达到抗菌的效果^[14]。此外,肉桂醛能够引起金黄色葡萄球菌蛋白质主链空间结构以及氢键体系改变,DNA单、双链结构断裂以及脂酰基链的结构断裂或产生相互交联,同时,改变细胞膜流动性,进而导致菌体难以生长^[15]。然而,柠檬醛与肉桂醛对冷鲜羊肉中细菌群落抑菌效果的研究鲜有报道。

高通量测序能够在微生物群落的研究上实现大规模平行测序^[16-17],较传统的食品微生物检测方法结果更全面、更精确,是辅助筛选靶向抑菌剂的有效方法^[18-19]。本研究根据羊肉的腐败规律,间隔不同时间采集4℃条件下贮藏的羊肉样本,采用高通量测序技术分析冷藏条件下的细菌群落组成演替规律,并结合现阶段研究热点针对性地选择柠檬醛、肉桂醛两种天然抑菌剂,以抑菌效果为评价标准筛选出抑菌效力较为优异的抑菌剂,测定其对腐败菌的最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC),明确羊肉腐败菌的靶向抑菌剂,为羊肉保鲜及深加工提供理论基础和技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜羊背肌:市售;磷酸盐缓冲液(phosphate buffer solution, PBS)、LB营养肉汤培养基:北京索莱宝科技有限公司;平板计数琼脂培养基:海博生物技术有限公司;脑心浸液肉汤培养基:北京陆桥技术股份有限公

司;肉桂醛(纯度98%)、柠檬醛(纯度97%):上海麦克林生化科技股份有限公司;嗜冷假单胞菌(BMZ015092)、热杀索丝菌(BMZ066756)、不动杆菌(BMZ135422):宁波明舟生物科技有限公司;溶酪葡萄球菌(24418)、养料嗜冷杆菌(24001):中国工业微生物菌种保藏管理中心。

1.2 仪器与设备

SHX150 III生化培养箱:上海树立仪器仪表有限公司;LDZX-50KBS立式压力蒸汽灭菌器:上海申安医疗器械厂;BSA124S-CW电子天平:赛多利斯科学仪器有限公司;TGL-16A医用离心机:湖南平凡科技有限公司;BioTEK/SynergyH1M酶标仪:青岛菲优特检测有限公司;SW-CJ-2FB型双人水平垂直两用净化工作台:苏州净化设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 冷鲜羊肉贮藏条件及腐败时间点的确定

羊肉在冷藏条件下的货架期一般在7d左右^[20],本试验所用羊肉样品为当日屠宰且从场地到取样时间控制在3h内。取得样品放置于4℃培养箱中冷鲜贮藏,并于0、2、5、7、9d进行一次取样。

1.3.2 冷鲜羊肉贮藏期间样本高通量测序分析

4℃下贮藏羊肉样本,并分别在0、2、5、7、9d称取定量样本放置于冻存管中于-80℃下冷冻。统一将羊肉样本送至上海美吉生物医药科技有限公司,委托其基于Illumina MiSeq技术测序平台进行高通量测序。将同一样本的聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)产物混合后使用2%琼脂糖凝胶回收PCR产物,使用AxyPrepDNA凝胶回收试剂盒切胶回收PCR产物,随后利用Tris-HCl缓冲液洗脱,2%琼脂糖电泳检测;利用氢氧化钠变性,产生单链DNA片段进行建库,后由上海美吉生物医药科技有限公司的MiSeq PE300平台完成测序。

1.3.3 天然抑菌剂对优势腐败菌抑菌效价的评定

1.3.3.1 菌悬液的制备

取羊肉优势菌株接种到对应培养基中,在37℃下摇床过夜,以200r/min振荡,并进行对数培养,直至菌悬液的浓度为 $10^6\sim 10^7$ CFU/mL,4℃保存备用。

1.3.3.2 抑菌性测试

采用牛津杯法进行抑菌性测试。在超净操作台上,将细菌所需要的琼脂培养基倒入平板中,待培养基凝固后,用移液枪注入200μL菌液,用涂布棒涂匀。每个平板中放置1个牛津杯,各自注入200μL配制好的对应浓度的抑菌剂,置于适合细菌生长的恒温培养箱培养24h后测量抑菌圈的大小。每个样品做3个平行,同时设置未添加抑菌剂的空白对照组。

1.3.3.3 最小抑菌浓度(MIC)的测定

利用二倍稀释法测定不同抑菌剂的MIC。采用无

菌 96 孔培养板, 分别于每行的前 11 孔加入细菌所需对应培养基 100 μL , 继而将每一行的第一个孔中打入 100 μL 对应抑菌剂, 吹打混匀后吸取第一个孔中的 100 μL 液体至第 2 孔中, 并用二倍稀释法稀释至第 11 孔, 将最后一个孔中多余的 100 μL 弃掉; 每四行的前三行 11 孔中加入 100 μL 试验菌液, 第四行的前 11 孔中加入 100 μL 培养基作为阳性对照组。1 至 4 行的 12 列孔中加入 200 μL 培养基作为培养基的对照组, 5 至 8 行的第 12 孔中分别加入 100 μL 培养基和受试细菌菌液作为阴性对照组。并将 96 孔培养板置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱培养 24 h, 利用酶标仪测定 600 nm 处的吸光度。

1.4 数据处理

使用生信云平台获取高通量测序结果, 并采用

Origin 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 高通量测序结果分析

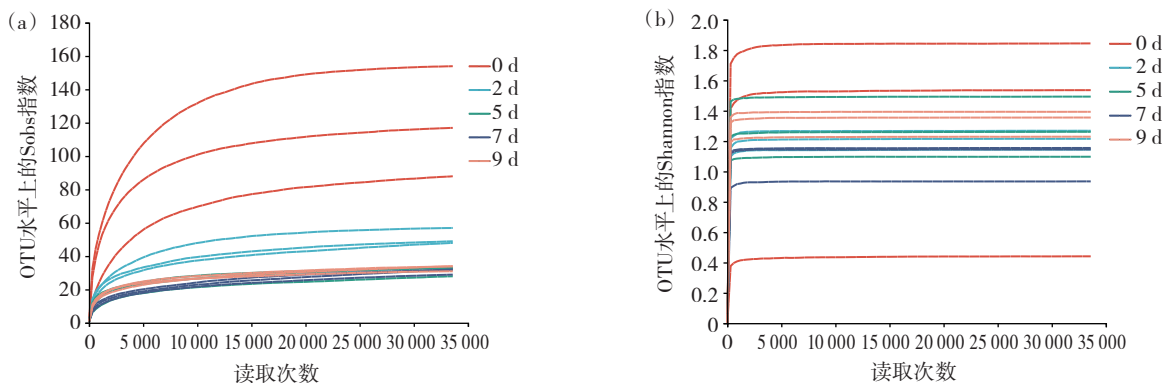
2.1.1 冷鲜羊肉贮藏期间微生物群落的 α 多样性分析
 α 多样性与细菌群落的多样性有关, 主要包括 Ace 指数、Chao 指数、Shannon 指数、Coverage 指数和 Simpson 指数等多种指数, Chao 和 Ace 指数对标群落的丰富度, Coverage 指数对标覆盖度, Shannon 和 Simpson 指数对标样本均匀程度^[21]。本研究对不同贮藏时间的冷鲜羊肉样品进行高通量测序, 同时利用最小样本数进行抽平, 根据 97% 的相似度进行聚类, 结果如表 1 和图 1 所示。

由表 1 可知, Shannon 和 Simpson 指数趋势相对平

表 1 冷鲜羊肉贮藏过程中细菌群落的多样性分析

Table 1 Bacterial diversity of chilled mutton during storage

时间/d	Sobs 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao 指数	Coverage 指数/%
0	92.5 \pm 9.19	1.58 \pm 0.18	0.45 \pm 0.04	95.00 \pm 6.44	94.92 \pm 6.01	99.98
2	39.67 \pm 3.06	1.16 \pm 0.06	0.44 \pm 0.02	46.01 \pm 6.14	43.20 \pm 0.72	99.99
5	20.00 \pm 1.00	1.23 \pm 0.17	0.34 \pm 0.04	25.83 \pm 0.89	27.25 \pm 5.95	99.99
7	20.33 \pm 1.15	1.05 \pm 0.13	0.44 \pm 0.12	35.40 \pm 12.05	28.33 \pm 5.51	99.98
9	23.00 \pm 2.65	1.29 \pm 0.09	0.33 \pm 0.03	25.79 \pm 4.39	24.17 \pm 3.69	99.99



(a) Sobs 曲线; (b) Shannon 曲线。

图 1 冷鲜羊肉样本的 Sobs 曲线和 Shannon 曲线

Fig.1 Sobs and Shannon curves of chilled mutton samples

稳, 说明样品均匀度相对较好。Ace 指数和 Chao 指数在贮藏前期降低趋势较为明显, 贮藏中后期发生小范围浮动变化, 说明冷鲜羊肉细菌菌群丰富度前期随着贮藏时间的延长菌群不断演替变化, 贮藏后期丰富度逐渐降低, 此时优势菌属逐渐显著。由图 1 可知, 多样性曲线随着测序数量的提高逐渐趋于平行, 说明测序数量已经达到饱和, 这个结果可以反映出冷鲜羊肉的微生物菌群组成, 也表明冷鲜羊肉在贮藏过程中微生物群落较为多样。不同贮藏时间样本的测序深度指数 Coverage 指数(表 1)均大于 99%, 表明送测样本的测序结果可以反映实际贮藏情况。

2.1.2 冷鲜羊肉贮藏期间群落组成分析

冷鲜羊肉贮藏过程中细菌群落在属水平的分布见图 2。

如图 2 所示, 在贮藏前期(0~2 d), 细菌种类复杂多样。溶酪葡萄球菌(*Macrococcus sp.*)在贮藏前期占有绝对优势, 相对丰度为 32.67%~75.30%。在贮藏中后期, 气球菌在各样品中的相对丰度大幅下降。5~9 d 阶段气球菌的相对丰度为 0.15%~1.14%。原因可能是气球菌在冷藏环境中受温度限制而丰度降低。从 2 d 开始, 热杀索丝菌(*Brochothrix sp.*)在各样品中的相对丰度大幅升高, 达到 53.56%, 后又逐渐降低, 在 9 d 降

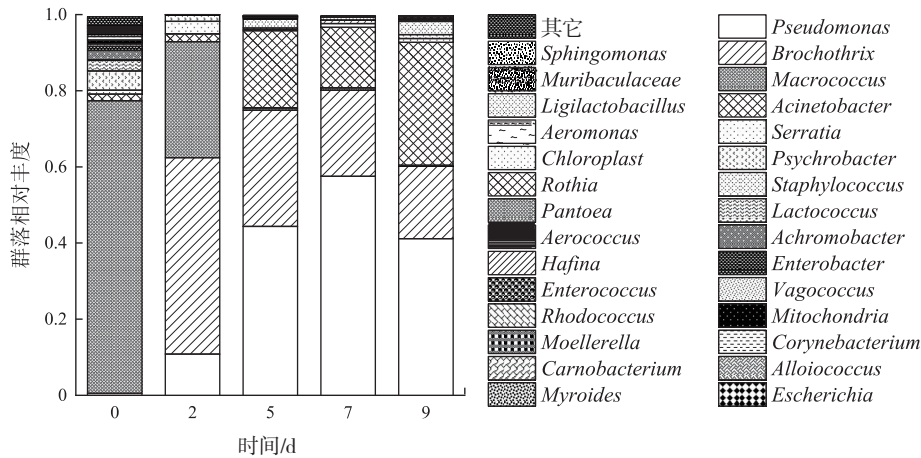


图2 冷鲜羊肉贮藏过程中细菌群落在属水平的分布

Fig.2 Genus-level bacterial community composition of chilled mutton during storage

至 19.12%。这是由于热杀索丝菌属是一种兼性厌氧微生物,冷藏环境中贮藏前期可利用葡萄糖作为基质^[22],后期由于葡萄糖含量逐渐降低,致其逐渐被其他优势菌所取代。嗜冷假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)在 5 d 前比例相对较低,但 5 d 后占比突然升高,在贮藏末期相对丰度达到 41.14%~57.52%,原因可能是其可利用葡萄糖作为生长基质,当葡萄糖含量较低时,转将氨基酸作为新的生长基质,从而使嗜冷假单胞菌的滋生能力优于其他竞争性菌群^[23]。嗜冷假单胞杆菌是冷鲜羊肉的优势腐败菌,这与周琰冰等^[24]的研究结果一致。在贮藏中后期(5~9 d),不动杆菌(*Acinetobacter*

sp.)开始生长,成为仅次于嗜冷假单胞菌和热杀索丝菌的第三大优势菌属。9 d 时不动杆菌的丰度达到 33.41%,成为贮藏后期的优势菌群。

2.2 天然抑菌剂抑菌效价的评定

2.2.1 抑菌性测试

在冷鲜羊肉中,腐败菌严重影响食品质量,危害人体健康^[25]。冷鲜肉保鲜中较为安全的保鲜措施是使用天然抑菌剂^[26]。柠檬醛和肉桂醛是符合国家标准天然食品添加剂,并具有广谱抑菌性。柠檬醛和肉桂醛对 5 种优势菌的抑菌活性见表 2。

从表 2 可以看出,两种抑菌剂对 5 种优势菌均有

表 2 两种抑菌物质对 5 种优势菌在 1% 浓度下的抑菌圈直径

Table 2 Inhibition zone diameters of two antimicrobial agents (1%) against five dominant bacteria

抑菌物质	抑菌圈直径/mm				
	热杀索丝菌	嗜冷假单胞菌	不动杆菌	养料嗜冷杆菌	溶酪葡萄球菌
空白对照	9.05±0.24	12.33±0.22	12.83±0.70	10.61±0.33	9.88±0.22
柠檬醛	13.51±0.16	16.87±0.02	20.19±0.56	17.02±0.32	16.33±0.50
肉桂醛	18.97±0.09	20.31±0.41	41.29±0.72	23.21±0.33	18.96±0.43

不同程度的抑制效果,这是因为醛类可以渗透进入细菌细胞内部,与细菌 DNA 发生相互作用,影响 DNA 的正常合成^[27]。不动杆菌和养料嗜冷杆菌对两种醛最为敏感,但是肉桂醛对 5 种优势菌的抑菌圈大于柠檬醛,说明肉桂醛的抑菌效果更好。这与顾春涛^[28]对肉桂醛在冷鲜肉中的抑菌效力研究结果一致,说明肉桂醛在冷鲜肉中具有很好的应用前景。

2.2.2 单一抑菌剂抑菌效力

选用柠檬醛和肉桂醛对冷鲜肉分离出的 5 种腐败菌进行抑菌能力测定,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,随着肉桂醛浓度的升高,腐败细菌的 OD₆₀₀ 值下降趋势明显,表明肉桂醛能有效抑制腐败细菌的生长。当肉桂醛浓度为 630 μg/mL,溶酪葡萄球菌、养料嗜冷杆菌、嗜冷假单胞菌、热杀索丝菌

的生长被有效抑制,其抑菌效果显著,而不动杆菌在浓度 2 500 μg/mL 时才被明显抑制。当柠檬醛浓度达到 630 μg/mL 时,仅能抑制溶酪葡萄球菌的生长,当浓度达到 1 250 μg/mL 时,仍未能抑制嗜冷假单胞菌的生长,相较肉桂醛抑菌效果较差。当肉桂醛浓度大于 1 250 μg/mL 时,肉桂醛对 5 种优势菌的抑菌效果与肉桂醛的浓度成反比,说明高浓度肉桂醛的抑菌效果降低。这可能是因为肉桂醛是一种疏水性物质,高浓度肉桂醛的反增塑效果要大于肉桂醛和模拟物间浓度差效果,导致其释放率低于低浓度肉桂醛,抑菌效果随之降低^[29]。

2.2.3 最小抑菌浓度(MIC)的测定

柠檬醛和肉桂醛两种天然抑菌剂对冷鲜肉中分离出的 5 株优势腐败菌的 MIC 值如表 3 所示。

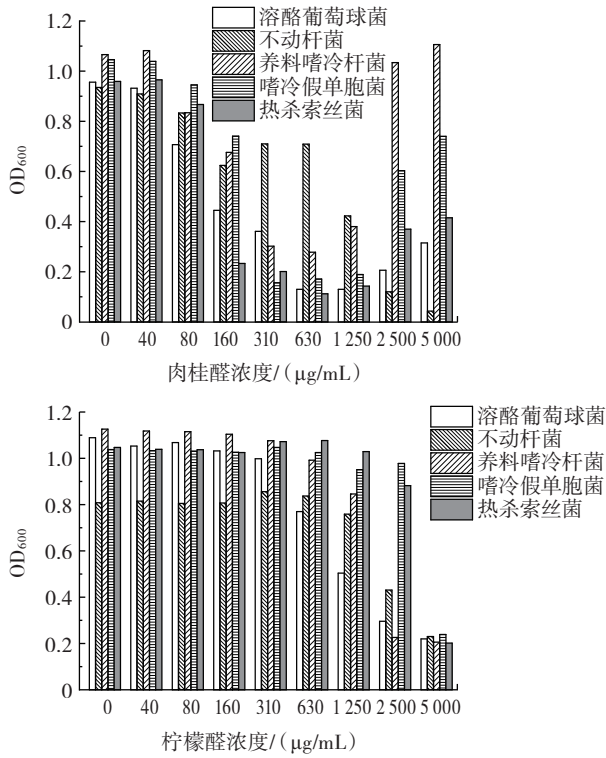


图3 不同醛类对羊肉腐败菌的抑菌效力

Fig.3 Inhibitory effects of different aldehydes on spoilage bacteria of chilled mutton

表3 柠檬醛和肉桂醛的MIC

Table 3 MIC of citral and cinnamaldehyde

抑菌剂	MIC/(µg/mL)				
	热杀索 丝菌	不动 杆菌	养料嗜 冷杆菌	溶酪葡萄 球菌	嗜冷假 单胞菌
肉桂醛	630	1 250	630	310	310
柠檬醛	2 500	2 500	1 250	630	2 500

由表3可知,柠檬醛对5种腐败菌株的MIC范围在310~2 500 µg/mL,与李兆双等^[30]的研究结果一致。肉桂醛对5种腐败菌株的抑制效果由强到弱依次为溶酪葡萄糖菌=嗜冷假单胞菌>养料嗜冷杆菌=热杀索丝菌>不动杆菌,对冷鲜羊肉优势腐败菌的抑菌效果具有显著效力。柴向华等^[31]发现肉桂醛对葡萄糖菌的MIC为500 µL/L,与本文MIC值310 µg/mL相近。

3 结论

微生物污染是冷鲜羊肉在生产、运输以及销售过程中品质下降和引发安全问题的主要原因。因此探究冷鲜羊肉在冷藏环境下的腐败菌组成其演替规律并筛选出天然抑菌剂是提高冷鲜羊肉质量安全的重要举措。

本文对4℃下不同贮藏时间的冷鲜羊肉样本进行高通量测序。从结果可以看出,高通量测序对冷鲜羊肉细菌群落的分析比其他研究方法更全面,信息量更

大。通过高通量测序技术能够快速了解冷鲜羊肉在贮存过程中的主要腐败菌为 *Pseudomonas psychrophila*、*Brochothrix thermosphacta*、*Macrococcus caseolyticus*、*Acinetobacter*、*Psychrobacter cibarius*。通过比较两种天然醛类的抑菌效力得出,肉桂醛对嗜冷假单胞菌的抑菌能力较强,MIC为310 µg/mL。柠檬醛对溶酪葡萄糖菌的抑菌能力较强,MIC为630 µg/mL。抑菌能力测定和MIC对比显示,肉桂醛的抑菌效果显著高于柠檬醛,这为后续冷鲜羊肉的防腐保鲜提供了理论依据。

目前柠檬醛和肉桂醛的作用机理和抗菌谱的研究还不够深入,其适用范围、使用量和使用方法还有待进一步明确。同时,醛类应用于食品时对食品风味的影响以及如何最大限度地发挥其功效也有待进一步探索。最后,如何将不同来源的天然食品防腐剂协同使用,达到互补或增益的效果,也值得日后深入探讨。

参考文献:

- [1] OLIVEIRA F M, OLIVEIRA R M, GEHRMANN BUCHWEITZ L T, et al. Encapsulation of olive leaf extract (*Olea europaea* L.) in gelatin/tragacanth gum by complex coacervation for application in sheep meat hamburger[J]. Food Control, 2022, 131: 108426.
- [2] GUO Z L, WU S Z, LIN J, et al. Active film preparation using pectin and polyphenols of watermelon peel and its applications for super-chilled storage of chilled mutton[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135838.
- [3] WIDMAR N O, THOMPSON N M, BIR C, et al. Perception versus reality of the COVID-19 pandemic in U.S. meat markets[J]. Meat Science, 2022, 189: 108812.
- [4] KAUR M, WILLIAMS M, BISSETT A, et al. Effect of abattoir, livestock species and storage temperature on bacterial community dynamics and sensory properties of vacuum packaged red meat[J]. Food Microbiology, 2021, 94: 103648.
- [5] XU M M, KAUR M, PILLIDGE C J, et al. Effect of protective cultures on spoilage bacteria and the quality of vacuum-packaged lamb meat[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102148.
- [6] TAO Y M, MA L, LI D D, et al. Proteomics analysis to investigate the effect of oxidized protein on meat color and water holding capacity in Tan mutton under low temperature storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111429.
- [7] GUO Z L, GE X Z, LI W Z, et al. Active-intelligent film based on pectin from watermelon peel containing beetroot extract to monitor the freshness of packaged chilled beef[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106751.
- [8] 胡美丽, 王俊钢, 李宇辉. 产细菌素乳酸菌在食品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(14): 4657-4664. HU Meili, WANG Jungang, LI Yuhui. Application of bacteriocin produced by *Lactobacillus* in food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(14): 4657-4664.
- [9] 胡美丽. 产细菌素乳酸菌的优选及在羊肉保鲜中的应用[D]. 石河子: 石河子大学, 2023. HU Meili. Optimization of bacteriocin-producing lactic acid bacteria and its application in mutton preservation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [10] MILLS J, DONNISON A, BRIGHTWELL G. Factors affecting microbial spoilage and shelf-life of chilled vacuum-packed lamb

- transported to distant markets: A review[J]. *Meat Science*, 2014, 98(1): 71-80.
- [11] CHENG S, SU R Y, SONG L Y, et al. Citral and trans-cinnamaldehyde, two plant-derived antimicrobial agents can induce *Staphylococcus aureus* into VBNC state with different characteristics[J]. *Food Microbiology*, 2023, 112: 104241.
- [12] 李瑶瑶, 黄英瑶, 翟瑞意, 等. 柠檬醛纳米乳液对鲑鱼鱼糜凝胶品质及贮藏稳定性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(24): 7842-7850.
- LI Yaoyao, HUANG Yingyao, ZHAI Ruiyi, et al. Effects of citral nano emulsion on the quality and storage stability of Spanish mackerel surimi gel[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(24): 7842-7850.
- [13] SUN Y N, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Nanoemulsion-based edible coatings loaded with fennel essential oil/cinnamaldehyde: Characterization, antimicrobial property and advantages in pork meat patties application[J]. *Food Control*, 2021, 127: 108151.
- [14] 陈咏琪, 姜金珠, 马志远, 等. 肉桂精油对动物体内外抗菌作用的研究进展[J]. *饲料研究*, 2023, 46(11): 168-171.
- CHEN Yongqi, JIANG Jinzhu, MA Zhiyuan, et al. Research progress on antibacterial effect of cinnamon essential oil on animals *in vitro* and *in vivo*[J]. *Feed Research*, 2023, 46(11): 168-171.
- [15] ZHANG Y B, LIU X Y, WANG Y F, et al. Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. *Food Control*, 2016, 59: 282-289.
- [16] 张腾帅, 张艳英, 刘京国. 变性梯度凝胶电泳法研究季节变化对散养芦花鸡肠道菌群的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(8): 129-134.
- ZHANG Tengshuai, ZHANG Yanying, LIU Jingguo. Effect of seasonal variation on intestinal microflora of free-range Luhua chicken analyzed by DGGE[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(8): 129-134.
- [17] 邹毅辉, 陈育青, 黄建军. 基于高通量测序分析覆盆子酵素自然发酵过程中的微生物多样性[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(9): 120-126.
- ZOU Yihui, CHEN Yuqing, HUANG Jianjun. Analysis of microbial diversity during natural fermentation of *Rubus chingii* Hu enzymes by high-throughput sequencing[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(9): 120-126.
- [18] 田海勇, 苏伟, 母应春, 等. 传统与强化发酵羊肉香肠微生物多样性及代谢物差异分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(24): 154-163.
- TIAN Haiyong, SU Wei, MU Yingchun, et al. Differences in microbial diversity and metabolites in naturally fermented and starter culture-fermented mutton sausages[J]. *Food Science*, 2022, 43(24): 154-163.
- [19] 陶飞燕, 潘创, 陈胜军, 等. 基于高通量测序技术分析微冻凡纳滨对虾的微生物[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(2): 104-113.
- TAO Feiyan, PAN Chuang, CHEN Shengjun, et al. Microbial analysis of *Litopenaeus vannamei* during partial freezing storage by Illumina high throughput sequencing[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(2): 104-113.
- [20] 马艳丽, 杜鹏飞, 王守经, 等. 4℃冷藏温度下羊肉新鲜度评价模型的构建[J]. *食品科技*, 2023, 48(2): 100-105.
- MA Yanli, DU Pengfei, WANG Shoujing, et al. Construction of freshness evaluation model for mutton at 4℃ storage[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(2): 100-105.
- [21] 丛筠格, 梁杉, 张敏. 基于传统培养和高通量测序分析德州扒鸡优势腐败菌及相关抑菌剂价效评定[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(17): 149-157.
- CONG Yunge, LIANG Shan, ZHANG Min. Analysis of dominant spoilage bacteria and the price effect evaluation of related antimicrobial agents in dezhou-braised chicken based on traditional culture and high-throughput sequencing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(17): 149-157.
- [22] 张莉, 马云昊, 王颖, 等. 冷藏过程中气调包装烧鸡的理化特性及腐败菌分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 188-195.
- ZHANG Li, MA Yunhao, WANG Ying, et al. Physicochemical characteristics and spoilage bacteria of modified atmosphere packaged braised chicken during refrigeration[J]. *Food Science*, 2023, 44(15): 188-195.
- [23] 陈文锦. 基于天然色素的冷鲜肉新鲜度比色指示材料的构建与应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- CHEN Wenjin. Construction and application of color indicator materials for chilled meat and freshness based on natural pigments[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [24] 周琰冰, 艾启俊, 张德权. 4℃贮藏期内冷鲜羊肉表面菌相变化分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(6): 242-245.
- ZHOU Yanbing, AI Qijun, ZHANG Dequan. Changes in microflora on fresh mutton during chilled storage[J]. *Food Science*, 2015, 36(6): 242-245.
- [25] SHAO L T, CHEN S S, WANG H D, et al. Advances in understanding the predominance, phenotypes, and mechanisms of bacteria related to meat spoilage[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 822-832.
- [26] ADARSH A, BHARATH C, KANTHESH B M, et al. Phytochemical screening and antimicrobial activity of '*Cinnamon zeylanicum*' [J]. *International Journal of Pharmaceutical Research and Innovation*, 2020, 13: 22-33.
- [27] 陈乐乐, 刘峰成, 龚番文, 等. 肉桂醛的生物学功能及其在畜禽养殖中的应用[J]. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(10): 4035-4044.
- CHEN Lele, LIU Fengcheng, GONG Fanwen, et al. Biological function of cinnamaldehyde and its application in livestock and poultry breeding[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(10): 4035-4044.
- [28] 顾春涛. 冷鲜牛肉特定腐败菌假单胞菌鉴定及肉桂醛对其抑制的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.
- GU Chuntao. Identification of *Pseudomonas* sp., a specific spoilage bacterium of chilled beef and its inhibition by cinnamaldehyde[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.
- [29] 肖力源. 玉米淀粉基抗菌膜的制备及抑菌成分释放研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.
- XIAO Liyuan. Preparation of corn starch-based antibacterial membrane and study on the release of antibacterial components[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [30] 李兆双, 王喜男, 王鹏, 等. 天然柠檬醛衍生物对食品腐败细菌的抑制活性[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(11): 1928-1933.
- LI Zhaoshuang, WANG Xinan, WANG Peng, et al. Antimicrobial activity of natural citral derivatives on food deterioration bacteria [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(11): 1928-1933.
- [31] 柴向华, 邹冬铎, 吴克刚, 等. 肉桂精油复配香芹酚和百里香酚对食用畜禽有害微生物熏蒸的抗菌活性[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(2): 187-195.
- CHAI Xianghua, ZOU Dongxin, WU Kegang, et al. Antibacterial activity of cinnamon essential oil compounded with carvacrol and thymol on fumigation against harmful microorganisms in edible livestock and poultry[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2024, 40(2): 187-195.